

ГЛАВА 3. АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Давление насыщенного пара определяется равенством:

$$p = nkT,$$

где n — концентрация молекул пара, T — температура пара.

Относительная влажность воздуха равна:

$$\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%,$$

где p — парциальное давление водяного пара при данной температуре, p_n — давление насыщенного пара при этой же температуре.

Сила поверхностного натяжения, действующая на границу поверхностного слоя длиной l :

$$F = \sigma l,$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения.

Дополнительное давление, обусловленное кривизной поверхности жидкости, которая находится в цилиндрической трубке, при полном смачивании (несмачивании):

$$\Delta p = 2\sigma/R,$$

где R — радиус трубки.

Высота поднятия жидкости в цилиндрическом капилляре над ее уровнем в широком сосуде при полном смачивании определяется по формуле:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r},$$

где ρ — плотность жидкости, r — радиус капилляра.

По этой же формуле определяется высота, на которую опускается жидкость в капилляре при полном несмачивании.

Относительная деформация растяжения (сжатия):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где l_0 — начальная длина образца, Δl — абсолютное удлинение образца.

Напряжение в образце, вызванное упругой силой F_y , действующей перпендикулярно площади сечения S , определяется отношением

$$\sigma_n = \frac{F_y}{S}.$$

Формула $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma_n}{E}$ выражает закон Гука при упругих деформациях, где E — модуль Юнга.

Относительное изменение объема жидкости или твердого тела ΔV при нагревании на ΔT :

$$\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta T,$$

где β — коэффициент объемного расширения.

Относительное изменение линейных размеров твердого тела Δl при повышении температуры на ΔT :

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T,$$

где α — коэффициент линейного расширения.

Для изотропных твердых тел $\beta = 3\alpha$.

3.1. Насыщенный пар. Фазовые переходы.

Влажность воздуха

Пример 3.1. В закрытом сосуде объемом 5 м^3 нагрели до 453 К 20 кг воды. Определите давление пара в сосуде. Плотность насыщенного пара при этой температуре равна $5,05 \text{ кг/м}^3$.

Дано: $V = 5 \text{ м}^3$, $m = 20 \text{ кг}$, $T = 453 \text{ К}$,

$\rho_n = 5,05 \text{ кг/м}^3$

$p = ?$

Решение: Определим массу насыщенного пара в данном сосуде при температуре $T = 453$ К, она равна $m_n = \rho_n V$ или $m_n = 5,05 \cdot 5 = 25,25$ кг. Видим, что $m_n > m$, следовательно, вся вода превратится в пар. Это значит, что масса пара в сосуде $m_1 = m = 20$ кг. Состояние ненасыщенного пара описывается уравнением Клапейрона — Менделеева:

$$pV = \frac{m_1}{M} RT.$$

Откуда давление пара в сосуде $p = \frac{m_1 RT}{MV}$,

где $M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль — молярная масса воды.

Числовое значение: $p = \frac{20 \cdot 8,31 \cdot 453}{18 \cdot 10^{-3} \cdot 5} = 0,84$ (Мпа).

Пример 3.2. Термос наполнили кипящей водой и герметично закрыли пробкой диаметром 3 см. Какая сила понадобится для того, чтобы вынуть пробку после охлаждения термоса до комнатной температуры?

Дано: $T = 373$ К, $d = 3 \cdot 10^{-2}$ м
 $F = ?$

Решение: Над кипящей водой находится ее насыщенный пар, давление которого равняется атмосферному ($p_0 = 0,1$ МПа), поэтому весь воздух из открытого термоса будет вытеснен водяным паром. После охлаждения под пробкой находится насыщенный пар, давление которого при комнатной температуре p_n .

Для того чтобы вытащить пробку, к ней надо приложить внешнюю силу F . Согласно второму закону Ньютона (без учета силы тяжести пробки и силы трения между пробкой и стенками термоса)

$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_0 + \vec{F}_n$, или в скалярной форме (с учетом того, что

$F_0 = p_0 S$, $F_n = p_n S$):

$$ma = F + p_n S - p_0 S.$$

Поскольку во время движения $a \geq 0$, то $F \geq (p_0 - p_n) \cdot S$.
Если учесть, что $p_n < p_0$, окончательно получим $F \geq p_0 S$.

$$\text{Площадь пробки } S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

$$\text{Таким образом, } F \geq \frac{\pi d^2 p_0}{4}.$$

$$\text{Числовое значение: } F = 10^5 \cdot \frac{3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 70,7 \text{ (Н)}.$$

Пример 3.3. В сосуде объемом $1,5 \text{ дм}^3$ находится воздух при температуре 290 К и влажности 50% . Сколько росы выпадает при изотермическом уменьшении объема в 3 раза?

$$\text{Дано: } V = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, T = 290 \text{ К}, \varphi = 0,5, n = 3$$

$$\Delta m \text{ — ?}$$

Решение: Масса водяного пара, находящегося в сосуде:

$$m = \rho V,$$

где ρ — плотность пара при $T = 290 \text{ К}$.

Из формулы относительной влажности $\varphi = \rho/\rho_n$ имеем:
 $\rho = \varphi \rho_n$, где ρ_n — плотность насыщенного пара при этой же температуре.

$$\text{Таким образом, } m = \varphi \rho_n V.$$

Если при изотермическом уменьшении объема выпала роса, значит пар стал насыщенным и его масса равна:

$$m_1 = \rho_n V_1 = \rho_n \frac{V}{n}.$$

Масса сконденсировавшегося пара (росы)

$$\Delta m = m - m_1 = \rho_n V \left(\varphi - \frac{1}{n} \right),$$

$\rho_0 = 14,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ — плотность насыщенного пара при $t = 200 \text{ К}$.

Числовое значение:

$$\Delta m = 14,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,5 - \frac{1}{3}\right) = 3,6 \text{ (мг)}.$$

3.1. Почему за самолетом, летящим очень высоко, возникает белый след?

3.2. Большая часть поверхности Земли покрыта водой. Почему, несмотря на это, атмосфера не насыщена водяным паром?

3.3. При каких условиях вода кипит без нагревания и замерзает при сжатии?

3.4. Определите плотность насыщенного водяного пара при температуре 373 К и нормальном атмосферном давлении.

3.5. Во сколько раз концентрация молекул насыщенного водяного пара при 293 К больше, чем при 283 К?

3.6. В баллоне вместимостью 50 л находится 0,3 г водяного пара при температуре 290 К. Как сделать пар насыщенным?

3.7. Во сколько раз плотность воды больше, чем плотность ее насыщенного пара при температуре 293 К?

3.8. Ненасыщенный водяной пар массой 0,9 г изотермично сжимают при температуре 302 К. При каком объеме пара начнется его конденсация?

3.9. В цилиндре под поршнем при температуре 300 К находится 15 мг воды и 25 мг водяного пара. Пар изотермично расширяется. Определите объем, соответствующий полному испарению воды.

3.10. Определите относительную влажность воздуха в помещении при температуре 291 К, если точка росы 283 К.

3.11. Определите абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление водяного пара в нем 14 кПа, а температура 333 К.

3.12. Относительная влажность воздуха 84%. Что показывают сухой и влажный термометры психрометра, если разница их показаний 1 °С; 2 °С?

3.13. В закрытом сосуде абсолютная влажность воздуха при 60 °С равна $5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$. Определите абсолютную и относительную влажность воздуха после понижения температуры до 20 °С.

3.14. Относительная влажность воздуха вечером при 289 К равна 55%. Выпадет ли ночью роса, если температура понизится до 281 К?